

Особенности разработки стандартных образцов для контроля ультразвуковых дефектоскопов.

Ч. 2. Расчётно-экспериментальная оценка параметров многоэлементных стандартных образцов

А. С. СОБОЛЕВ¹, В. И. ПУДОВ¹, Ю. И. ДИДИК²

¹ Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Уральский научно-исследовательский институт метрологии, Екатеринбург, Россия, e-mail: lemma@uniim.ru, pudov@imp.uran.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой и конструированием твёрдотельных многоэлементных стандартных образцов в виде упорядоченного набора плоских угловых отражателей. Установлены основные параметры оптимизации и приведён перечень рекомендуемых к нормированию метрологических характеристик стандартных образцов.

Ключевые слова: многоэлементный стандартный образец, ультразвуковой метод неразрушающего контроля.

A complex of issues related to the design and construction of solid-state multi-element reference materials (RM) as ranked set of flat corner reflectors is considered. The basic parameters for multi-element RM optimization are shown. The list of recommended for normalization metrological characteristics for multi-element RM is presented.

Key words: multi-element reference material, ultrasonic non-destructive testing method.

В первой части статьи рассмотрены общие принципы и условия построения самостоятельной группы многоэлементных стандартных образцов (СО) для контроля нелинейности электроакустического тракта ультразвуковых дефектоскопов [1]. Установлено, что данные СО применительно к ультразвуковому (УЗ) контролю целесообразно создавать как многоэлементную твёрдотельную конструкцию (матрицу) в виде упорядоченного набора плоских угловых отражателей (ПУО), ранжированных по отношению площадей отражающей вертикальной стенки.

Цель данной работы — разработка конструкции и расчётно-экспериментальная оценка параметров предлагаемых многоэлементных СО.

Формирование акустического поля наклонным пьезоэлектрическим преобразователем в СО из стали Ст20. На рис. 1 представлена схема хода УЗ-лучей в системе: наклонный преобразователь — материал СО с ПУО в качестве модели дефекта.

Призма 1 и пластина 2 в форме диска из пьезокерамики на основе цирконата-титаната свинца формируют акустическое поле в материале СО [2–4]. Толщину δ пьезопластины находят по формуле [2]:

$$\delta = \lambda_1/2 = c_1/2f, \quad (1)$$

где λ_1 — длина продольной волны в материале; $c_1 = 3300$ м/с — скорость продольной волны в материале пьезопластины; f — рабочая частота наклонного пьезоэлектрического преобразователя (для $f = 2,5$ МГц $\delta = 0,7$ мм).

Диаметр пластины оценивают приблизительно $D = 24 \dots 30$ МГц⁻¹ · мм (при $f = 2,5$ МГц значение $D = 8 \dots 12$ мм [2]).

Посредством радиоимпульса, воздействующего на пьезопластину 2, в призме 1 возбуждают УЗ-волну с продольной поляризацией (продольная волна), которую подводят к материалу СО в точке ввода О. Призму изготавливают из оргстекла ($c_1 = 2670$ м/с). Призма характеризуется углом призмы β , который может изменяться от 30° до 55° и определяет угол α ввода УЗ-волн в материал СО [2, 5]. При углах больше первого критического $\beta_1 = 27,5^\circ$ и меньше второго

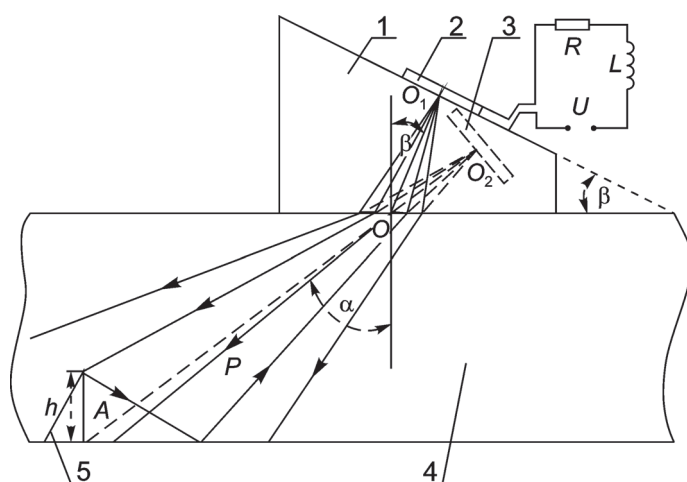


Рис. 1. Схема хода УЗ-лучей в системе с элементами электроакустического тракта: наклонный преобразователь — материал СО, содержащий ПУО:

1 — призма; 2 — пьезопластина; 3 — мнимое изображение пьезопластины; 4 — материал стандартного образца; 5 — плоский угловой отражатель

критического $\beta_2 = 57^\circ$ продольная волна в т. О трансформируется в УЗ-волну поперечной поляризации (поперечную волну). В углеродистой стали Ст20 скорость распространения поперечной волны $c_T = 3230$ м/с [2, 5]. Соотношение между β и α приведено в табл. 1 [2]. Между α и β существует линейная зависимость с коэффициентом пропорциональности около 1,3.

Таблица 1
Соотношение между углами призмы β и ввода α

Угол	Значение, °				
β	30	40	50	53	55
α	39	50	65	70	74

Акустическое поле, создаваемое наклонным преобразователем, имеет сложную структуру. Это поле подразделяют на две зоны: ближнюю — зона Френеля и дальнюю — Фраунгофера [2]. В ближней зоне поле неустойчивое, с большими осцилляциями, и эту зону практически не применяют для УЗ-дефектоскопии. Поперечное сечение УЗ-пучка в ближней зоне приблизительно соответствует диаметру пьезопластины наклонного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), а длина не превышает пределы призмы ПЭП [2]:

$$X_n = (D^2)/[4\lambda_1 (\cos \alpha / \cos \beta)]. \quad (2)$$

Из (2) следует, что длина ближней зоны возрастает квадратично с увеличением диаметра пьезопластины; уменьшается с ростом длины УЗ-волны и зависит от соотношения α к β (для $D = 12$ мм, $\lambda_1 = 1,32$ мм, $\beta = 45^\circ$, $\alpha = 60^\circ$ — $X_n = 19$ мм).

В УЗ-дефектоскопии используют дальнюю зону с более плавным падением интенсивности акустического поля. Это поле моделируют в виде пучка УЗ-лучей, расходящихся из центра — фокуса O_1 пьезопластины.

Рассмотрим формирование акустического поля наклонным ПЭП в дальней зоне. Поле создаётся УЗ-лучами, которые преломляются на границе оргстекло—сталь. В материале СО центральный луч OP преломлённого пучка и акустическая ось OA наклонного ПЭП расходятся. Это происходит из-за уменьшения коэффициента прозрачности с ростом угла β , что приводит к смещению центрального луча (угла ввода) в сторону меньших углов от преломлённой акустической оси OA . Кроме этого, эффект искривления акустической оси из-за разности путей прохождения лучей в материале СО, преломлённых под разными углами в пучке, также приводит к уменьшению угла α . В результате в плоскости падения диаграмма направленности асимметрична, асимметрия увеличивается с ростом β .

Для расчёта акустического поля вводят понятие мнимой пьезопластины 3, в фокусе O_2 которой сходится преломлённый пучок, формируемый реальной пьезопластинкой [2]. Акустическое поле от мнимого источника представляют как поле эллиптической формы с полуосями $D(\cos \alpha / \cos \beta)$ в плоскости падения и D в перпендикулярной плоскости [2]. Распространяясь в материале СО, поле из-за акустического сопротивления материала раскрывается в конусообразную форму, сохраняя прежнюю эллиптичность пучка. Таким образом, на отражающую вертикальную стенку ПУО падает пучок, от-

ношение осей которого по высоте h и ширине b , как отношение осей эллипса $\cos \alpha / \cos \beta$, т. е. эллипс сжат по высоте и вытянут по ширине. С уменьшением угла α деформация пучка по высоте и ширине увеличивается.

Угловое раскрытие φ пучка в плоскости падения оценивают из выражения [2]:

$$\varphi = \arcsin [1,22 (\lambda_n / D)(\cos \beta / \cos \alpha)], \quad (3)$$

где λ_n — длина поперечной волны, распространяющейся в материале СО (для $D = 12$ мм, $\lambda_n = 1,3$ мм, $\beta = 45^\circ$, $\alpha = 60^\circ$ $\varphi \sim 11^\circ$).

Размеры ПУО не превышают 3,5 мм даже для максимально возможной площади 10 мм², что существенно меньше распространённых диаметров пьезопластины, например 8 мм. Поэтому отражающую вертикальную стенку ПУО в дальней зоне облучает только часть расширяющегося УЗ-пучка, порождающего эхо-сигнал. Эхо-сигнал формируют акустическая и электрическая составляющие тракта дефектоскопа. Акустическая составляющая тракта включает призму 1 из оргстекла, керамическую пьезопластину 2, материал СО 4 и ПУО 5. Электрическая составляющая тракта содержит электрические цепи генератора и приёмника ультразвука, на рис. 1 она представлена источником напряжения U , активным сопротивлением R и индуктивностью L . Эхо-сигнал формирует акустическая составляющая тракта, а его электрическая составляющая выполняет пассивную функцию, позволяя регулировать параметры посылаемого и принимаемого ультразвука посредством изменения параметров R , L . Поэтому вклад акустической составляющей в формирование нелинейности всего электроакустического тракта определяющий.

Приведённая выше упрощённая модель формирования наклонным ПЭП акустического поля и связанного с ним эхо-сигнала позволяет оценить основные параметры СО, а также влияние отклонений ПУО от нормы по углу θ и отношению h/b на формирование эхо-сигнала. Угол θ — ориентация отражающей вертикальной стенки ПУО относительно плоскости основания СО.

Основную оценку параметров СО производят для технически трудно реализуемой площади стенки ПУО 5 мм². Для отражающей вертикальной стенки квадратной формы длина сторон составит приблизительно 2,24 мм, что существенно больше половины длины (0,6 мм) падающей на неё поперечной волны частотой 2,5 МГц. Это исключает влияние дифракционных эффектов, упрощает модель пучка и позволяет применять к упрощённой модели известные закономерности геометрической акустики, например закон Снеллиуса [2]. Площадь 5 мм² в зависимости от углов ввода соответствует разным определяющим предельную чувствительность УЗ-дефектоскопов, эквивалентным площадям плоскодонного отражателя, принятого в России за эталонный отражатель (табл. 2) [5].

Поскольку диапазон изменения эхо-сигналов достаточно широк, он перекрывается локальными сигналами, формируемыми набором плоских угловых отражателей. Они ранжируются по основному рабочему параметру — площади S отражающей вертикальной стенки, т. е. $S = hb$, где h , b — соответственно высота и ширина стенки. Ранжирование осуществляется в логарифмическом масштабе по отношениям площадей S_i отражающей вертикальной стенки всех элементов к площади S_0 стенки опорного элемента, привязанного к параметрам реальных дефектов.

Эквивалентные площади многоэлементных отражателей составляют $S_i = K_c h b$. Коэффициент K_c зависит от угла α ввода УЗ-колебаний в материал многоэлементных отражателей (табл. 2) [5].

Таблица 2

Коэффициент K_c соотношения эквивалентной площади плоскодонного отражателя к площади отражающей вертикальной стенки ПУО для разных углов ввода α

Параметры	Значения параметров						
$\alpha, ^\circ$	40	45	50	55	60	65	70
K_c	2,40	1,80	1,30	0,85	0,58	0,51	0,75

Эквивалентная площадь плоскодонного отражателя связана с площадью стенки ПУО: она снижается с ростом угла α , достигает минимума при $\alpha = 65^\circ$ и возрастает при дальнейшем увеличении этого угла. В результате при распространённых углах ввода 50; 60; 65; 70° эквивалентная площадь плоскодонного отражателя составит около 6,5; 2,9; 2,6; 3,8 мм², соответственно. Минимум коэффициента K_c при $\alpha = 65^\circ$ обусловлен максимальной трансформацией на поверхности стенки ПУО поперечной волны в рассеиваемую в материале СО продольную волну, что приводит к замедлению роста амплитуды эхо-сигнала с увеличением площади стенки в области углов ввода 60; 65; 70° [6]. Этот эффект необходимо учитывать при практическом применении данных СО.

Оценка параметров СО. При разработке многоэлементных СО необходимо решить вопросы, связанные с оптимизацией их конструкции.

Оценка геометрических параметров конструкции СО [7—10]. Оценку расстояния между ПУО, размещённых на одной глубине по длине основания СО, связывают с фронтальной разрешающей способностью УЗ-дефектоскопа (конусообразные пучки ультразвуковых лучей, облучающих соседние ПУО, не должны перекрываться). Размер сечения пучков зависит от размера пьезопластины наклонного преобразователя и угла раскрытия пучка, определяемого длиной пути лучей до ПУО в дальней зоне. Схему размещения ПУО оптимизируют, располагая их в 2 параллельных ряда вдоль длины основания СО. Для двухрядной схемы необходимое расстояние между ПУО, их рядами и границей СО можно принять одинаковым. Оценку этих расстояний проводят из условия фронтальной разрешающей способности УЗ-дефектоскопа. Влияние размера стенки ПУО не учитывают, так как даже максимальный размер площади 10 мм² соответствует $h = b \geq 3,5$ мм, что меньше минимального диаметра пьезопластины 6 мм (для рабочей частоты 2,5 МГц $D \approx 10$ мм).

При толщине H СО выражение для максимальной фронтальной разрешающей способности ΔL оценивают как

$$\Delta L \approx D + 2H \operatorname{tg} \varphi,$$

где φ находят по (3).

Длину L и ширину B материала СО в двухрядной схеме размещения оценивают на основе значений: $D = 12$ мм, $\varphi = 11^\circ$, $H = 30$; 10 мм; $\Delta L = 24$; 14 мм. В этом случае B не зависит от числа размещаемых ПУО и при $H = 30$; 10 мм составляет не более 75; 55 мм, соответственно. Длина L зависит от толщины H и числа ПУО в ряду, которое выбирают в зависимости от шага ранжирования, связывая его с дискретностью отсчё-

та по шкале УЗ-дефектоскопа. Например, для УД2-12 погрешность отсчёта составляет 0,5 дБ, что соответствует амплитуде эхо-сигнала 20 дБ и относительной погрешности 2,5 %. В этом случае шаг ранжирования будет равен 1 и более децибел. Число ПУО с площадью отражающей вертикальной стенки ниже нормы зависит от минимальных технически возможных размеров стенки 1 мм [1], что соответствует площади квадратной стенки 1 мм², которую принимают в качестве оценочной. Для опорного ПУО с площадью стенки 5 мм² при переходе к 1 мм² амплитуда эхо-сигнала уменьшится на 14 дБ, при шаге ранжирования 1; 2 дБ число ПУО составит 14; 7 соответственно. Если принять число ПУО с площадью стенки, большей 5 мм², равным 2 при шаге 1 дБ и 1 — при шаге 2 дБ, то общее число ПУО в каждом ряду составит 8; 4, соответственно. Длина L материала СО при принятых ранее допущениях составит 250 и 150 мм. Влияние отражений от прямых углов исключают, скругляя их по радиусу 10 мм.

Таким образом, многоэлементную конструкцию СО представляют в форме пластины из углеродистой стали типа Ст20 с габаритными размерами L , B и H и скругленными углами, в которой со стороны основания размещены в 2 ряда ПУО, на одинаковом расстоянии друг от друга и границ СО. Это расстояние определяется разрешающей способностью УЗ-дефектоскопа. Основными параметрами оптимизации в таком случае становятся толщина материала СО, шаг ранжирования и число ПУО. Количество типов СО минимизируют за счёт использования СО только с шагом ранжирования 1; 2 дБ. Круг контролируемых УЗ-дефектоскопов расширяют, уменьшая шаг ранжирования при сокращении толщины СО, что позволяет разместить большее количество ПУО в материале СО.

Оценка влияния отклонения от нормы угла θ и отношения h/b на амплитуду эхо-сигнала. Основным элементом конструкции предлагаемых СО является ПУО с отражающей вертикальной стенкой в виде плоскости высотой h и шириной b [7—10]. Плоскости этой стенки и основания СО перпендикулярны ($\theta = 90^\circ$). Допустимое отклонение θ составляет $\pm 1^\circ$, что соответствует допустимому уменьшению амплитуды эхо-сигнала на 2 дБ, а для амплитуды эхо-сигнала 20 дБ — относительной погрешности 10 %, при $0,5 < h/b < 4$ [5]. Техническое изготовление такой стенки достаточно сложно, поэтому возникает задача экспериментального исследования влияния θ и отношения h/b в широком диапазоне на амплитуду эхо-сигнала при разных углах ввода. Образцы для экспериментов содержат наборы ПУО с площадями отражающей вертикальной стенки 7; 5 мм², углами $\theta = 90^\circ$ и с отклонениями θ от 90° в большую и меньшую стороны. Так же изготовили образцы наборов ПУО аналогичной площади, содержащие вертикальные отражающие стенки с отношениями $(h/b) = 1$, $(h/b) > 1$, $(h/b) < 1$. Для оценки влияния углов θ и отношения h/b используют сертифицированный дефектоскоп типа УД2-12 с дискретностью отсчёта амплитуд эхо-сигналов 0,1 дБ и возможностью оценки эквивалентных площадей отражателей в диапазоне 3—30 мм². Дефектоскоп комплектуют двумя совмещёнными наклонными преобразователями с рабочей частотой 2,5 МГц и углами ввода 60, 70°, соответственно, и круглой пьезопластинкой $D = 12$ мм. Результаты экспериментов в виде зависимости падения амплитуды эхо-сигналов на ΔN от отклонений $\Delta \theta$ для угла 90° ; $\Delta(h/b)$ от 1 (для площади стенки 5 мм², углов ввода 60, 70°) представлены на рис. 2, 3, соответственно.

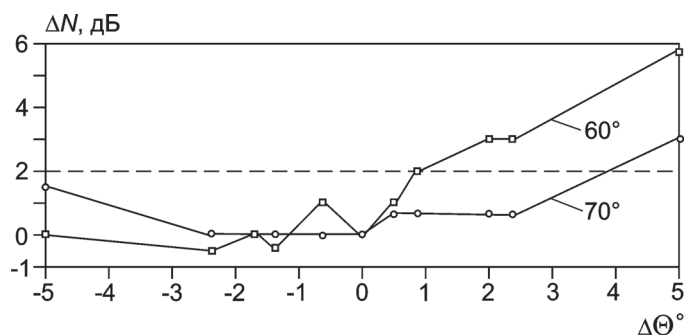


Рис. 2. Зависимость изменения ΔN амплитуды эхо-сигнала от отклонения плоскости отражающей вертикальной стенки от 90° относительно плоскости основания СО при углах ввода 60 и 70° (пунктирная линия определяет норму уменьшения амплитуды эхо-сигнала в 2 дБ)

С ростом отклонения θ от 90° в большую сторону ($+\Delta\theta$) наблюдают уменьшение на ΔN амплитуды эхо-сигнала дефектоскопа для обоих углов ввода (с большей интенсивностью для $\theta = 60^\circ$). Так, для $\theta = 60^\circ$ ΔN составляет 2 дБ при $+\Delta\theta \geq 1^\circ$ и достигает 6 дБ для $+\Delta\theta = 5^\circ$, а для $\theta = 70^\circ$ ΔN остается в норме вплоть до $+\Delta\theta = 4^\circ$, достигая при $+\Delta\theta = 5^\circ$ только 3 дБ. При отклонениях θ от 90° в меньшую сторону ($-\Delta\theta$) наблюдают (без выхода за норму) падение на ΔN амплитуды эхо-сигнала с ростом отклонения. Эта тенденция сильнее выражена для $\theta = 70^\circ$. Результаты экспериментов можно пояснить, используя законы геометрической акустики.

На рис. 4 приведена схема хода УЗ-лучей при облучении стенки ПУО для $\theta = 90^\circ$; $+\Delta\theta$ для $\theta > 90^\circ$; $-\Delta\theta$ для $\theta < 90^\circ$. При малых отклонениях $\pm\Delta\theta$ от 90° получают приближенные значения углов изменения $\pm\Delta\alpha$ отраженных УЗ-лучей. Знак плюс при $\Delta\alpha$ означает рост расхождения относительно отраженных от стенки ПУО лучей с $\theta = 90^\circ$ (потерянная, т. е. не принятая первичным преобразователем дефектоскопа, часть УЗ-пучка увеличивается), а знак минус — его сокращение (потерянная часть УЗ-пучка уменьшается). При отклонении $+\Delta\theta$ получим соотношение вида $+\Delta\theta \approx (+\Delta\alpha)$. Из геометрической акустики следует, что с уменьшением α возрастает $+\Delta\alpha$. Это поясняет наблюдаемую в эксперименте тенденцию по большему уменьшению амплитуды эхо-сигнала при $\theta = 60^\circ$ по сравнению $\theta = 70^\circ$. При $-\Delta\theta$ ситуация изменяется. В этом случае получают соотношение вида: $-\Delta\theta \approx -\Delta\alpha$. При этом с ростом угла ввода с 60° до 70° расхождение $-\Delta\alpha$ увеличивается, доля потерянной части УЗ-пучка возрастает, и в эксперименте наблюдается падение амплитуды эхо-сигнала.

Для экспериментальной зависимости уменьшения на ΔN амплитуды эхо-сигнала при отклонении отношения h/b от 1, $+\Delta(h/b)$ означает разность между $(h/b) > 1$ и 1, а $-\Delta(h/b)$ — разность между $(h/b) < 1$ и 1. Из рис. 3 следует, что при $-\Delta(h/b)$ амплитуда эхо-сигнала снижается в пределах нормы в 2 дБ вплоть до отклонения $-\Delta(h/b) = -0,5$ (т. е. $(h/b)=0,5$) и практически не зависит от угла ввода. Для отклонений $+\Delta(h/b)$ наблюдают тенденцию роста их влияния на ΔN , более заметную после выхода за норму при $\Delta(h/b) > 0,6$ для угла ввода 60° по сравнению с углом ввода 70° .

Так как УЗ-пучок облучающий стенку ПУО эллиптически, то в случае $(h/b) < 1$ (для $-\Delta(h/b)$) эллипс вытянут по ширине и влияния изменения по высоте на ΔN менее значимо и практически не зависит от угла ввода. При $(h/b) > 1$ (для $+\Delta(h/b)$)

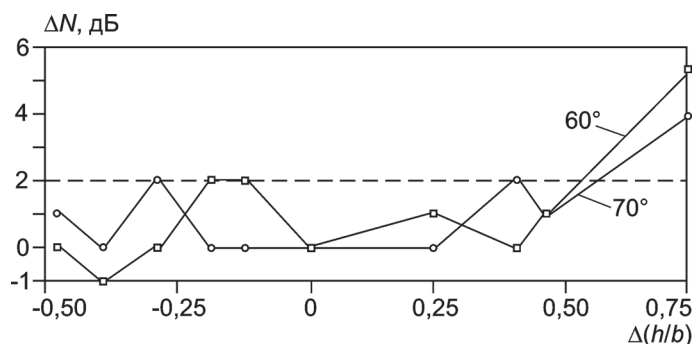


Рис. 3. Зависимость изменения ΔN амплитуды эхо-сигнала от отклонения отношения h/b от 1 при углах ввода 60, 70° (пунктирная линия определяет норму уменьшения амплитуды эхо-сигнала в 2 дБ)

ситуация изменяется: для $+\Delta(h/b) > 0,5$ появляется зависимость ΔN от угла ввода. Так, при $\Delta(h/b) = 0,75$, ΔN возрастает на 1,5 дБ для $\theta = 60^\circ$ из-за роста сжатости эллипса по h с увеличением угла ввода.

Таким образом, отклонения от 90° угла θ на $\pm 1^\circ$ и отклонения отношения h/b от 1 на уровне 0,1 допустимы при изготовлении отражающей вертикальной стенки ПУО (амплитуда эхо-сигнала уменьшается в пределах 2 дБ).

Оценка коэффициента преобразования. В дальней зоне приближенную линейную зависимость отношений N_i амплитуд эхо-сигналов от отношений n_i площадей отражающих вертикальных стенок ПУО характеризуют коэффициентом преобразования [1]:

$$K_n \approx N_i / n_i$$

При строго линейном преобразовании $K_n = 1$. Однако из-за влияющих факторов линейность преобразования нарушается, значение K_n отклоняется от 1, формируя зону неопределенности $\pm\Delta K_n$ [10]. Авторы используют выражение «зона неопределенности» в качестве аналога понятия «нижняя и верхняя границы нелинейности» в [11].

Значение коэффициента преобразования, близкое к действительному, находят, оценивая значения ΔK_n расчетно-экспериментальным методом, что делает необходимыми поиск и оценку влияния основных источников погрешностей формирования n_i . К ним относят: погрешность определения размеров площадей стенки; отклонения отношения (h/b) от 1; отклонение угла θ от 90° плоскости стенки относительно плоскости основания СО; погрешность δ_N определения отношения амплитуд эхо-сигналов N_i при формировании для них условной шкалы порядка.

Относительную погрешность δ_{K_n} коэффициента преобразования K_n представляют в виде приближенного выражения [13]:

$$\delta_{K_n} \approx K_\Sigma \left(\delta_{h_0}^2 + \delta_{b_0}^2 + \delta_{h_i}^2 + \delta_{b_i}^2 + \delta_\theta^2 + \delta_{h/b}^2 + \delta_N^2 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где $K_\Sigma = 1,1$; δ_{h_0} , δ_{b_0} , δ_{h_i} , δ_{b_i} , δ_θ , $\delta_{h/b}$ — относительные погрешности определения высоты h_0 , ширины b_0 стенки опорного ПУО, высоты h_i , ширины b_i стенок i -х ПУО; влияния отклонения θ от 90° и h/b от 1.

Погрешность формирования отметок шкалы n_i существенно зависит от точности изготовления стенки ПУО и погрешностей измерения параметров ПУО. Размеры на уровне 1 мм измеряют профилометром TR-200 с погрешностью не более 0,5 % (для 1 мм значение абсолютной погрешности не превысит 5 мкм) [14]. Погрешности измерения углов типовыми угломерами в области 90° составляют не более 0,1°, т. е. относительная погрешность не превышает 0,15 %. Примем $\delta_{h_0} = \delta_{b_0} = \delta_{h_i} = \delta_{b_i} = 0,5 \%$ (причём $\delta_{h_0}, \delta_{b_0}$ будут даже меньше 0,5 %, так как h_0, b_0 больше 1 мм). Например, для опорного ПУО площадью стенки $S_0 = 5 \text{ мм}^2$ значения h_0, b_0 (при квадратной форме стенки) составят приблизительно 2,24 мм.

Из анализа экспериментальных зависимостей ΔN от $\Delta \theta$ (см. рис. 2) и ΔN от h/b (рис. 3) получают оценку $\delta_{\theta}, \Delta_{h/b}$ на уровне 1; 2 %, соответственно. Значение δ_N составит не более 2,5 % при погрешности отсчёта показаний 0,5 дБ по шкале дефектоскопа УД2-12 и типовых амплитудах эхо-сигнала 20...30 дБ. Путём подстановки этих значений в выражение (4) получают оценку относительной погрешности для коэффициента преобразования на уровне не более 4 % ($\Delta K_n \approx 0,04$). Коэффициент K_n представляют в виде: $K_n \approx 1,00 \pm 0,04$, учитывая уменьшение $\delta_{h_0}, \delta_{b_0}$ получают $K_n \approx 1,00 \pm 0,03$. Реальное значение ΔK_n — зоны неопределённости для СО — может отличаться от этих значений из-за особенностей конструкции СО, технических возможностей изготовления ПУО и применяемых для оценки параметров СО средств измерений. Значение зоны неопределённости связывают с полем допуска ΔP нормируемого для конкретных условий ультразвукового контроля. Часто за норму для поля допуска принимают $\Delta P = \pm 2 \text{ дБ}$. Зона неопределённости для СО нормированная, согласно метрологическим требованиям, на уровне 1/3 от ΔP , составит в этом случае не более 0,7 дБ. Например, для амплитуд эхо-сигналов на уровне 20 дБ зона неопределённости при $\Delta K_n \approx 0,03$ составит 0,6 дБ.

Нормирование метрологических характеристик СО. Для предлагаемых СО рекомендуют нормировать следующие метрологические характеристики:

номинальный коэффициент преобразования УЗ-волн отражающими вертикальными стенками ПУО в амплитуды эхо-сигнала $K_n = 1$;

отклонение от номинального коэффициента преобразования $K_n = 1$ в виде зоны неопределённости ΔK_n не более 1/3 от значения поля нормированного поля допуска ΔP ;

номинальный шаг ранжирования по отношениям площадей n_i в логарифмическом масштабе для стенки ПУО может составлять 0,5; 1; 1,5; 2 дБ в диапазоне изменения $n_i = +6 \dots -20 \text{ дБ}$;

отклонение от номинального шага ранжирования не более 1/3 его номинального значения.

Действительные значения метрологических характеристик указывают в паспорте СО.

Заключение. В многоэлементном СО, содержащим упорядоченный набор ПУО, формируется акустическое поле конусообразной формы эллиптического сечения с полуосями, ориентированными вдоль отражающей вертикальной стенки ПУО. Показано, что основными параметрами оптимизации многоэлементной твердотельной конструкции СО являются толщина материала, шаг ранжирования и число ПУО, что позволяет их варьированием минимизировать число создаваемых СО. При оценке факторов, влияющих на

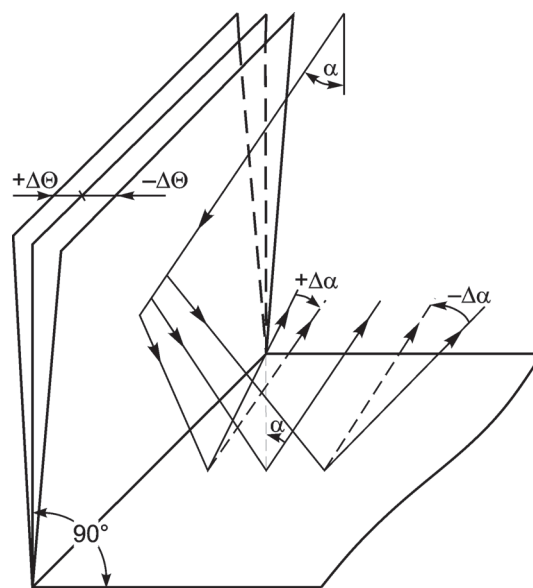


Рис. 4. Схема хода УЗ-лучей для $\theta = 90^\circ$ и при отклонениях угла θ от 90° ($+\Delta\theta$ для $\theta > 90^\circ$, $-\Delta\theta$ для $\theta < 90^\circ$)

формирование амплитуды эхо-сигнала от ПУО, выявлено, что отклонение углов θ от 90° на $\pm 1^\circ$ и отклонение отношения h/b от 1 на 0,1 допустимо и вызывает уменьшение амплитуды эхо-сигналов не более, чем на 2 дБ.

Представленная конструкция многоэлементных СО позволяет оперативно получать информацию о нелинейности всего электроакустического тракта УЗ-аппаратуры. Предложенный способ оценки нелинейности более эффективнее, чем оценка нелинейности только электрической составляющей электроакустического тракта [12].

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России «Диагностика» (№ 01201463329).

Л и т е р а т у р а

1. **Соболев А. С., Пудов В. И., Дидик. Ю. И.** Особенности разработки стандартных образцов для контроля ультразвуковых дефектоскопов. Часть 1. Общие принципы построения многоэлементных стандартных образцов // Измерительная техника. 2015. № 8. С. 60—65.
2. **Ермолов И. Н., Ланге Ю. В.** Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004.
3. **ГОСТ 23829—85.** Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения.
4. **ГОСТ 26266—90.** Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования.
5. **ГОСТ 14782—86.** Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
6. **Гребенник В. С.** Уточнение характера зависимости амплитуды эхо-сигнала от величины отражателя углового типа // Дефектоскопия. 1976. № 6. С. 122—124.
7. **Пат. № 2310838 РФ.** Устройство для настройки ультразвуковых преобразователей-дефектоскопов / В. И. Пудов, А. С. Соболев, В. А. Бланин // Изобретения и полезные модели. 2007. № 32.

8. Пудов В. И., Соболев А. С. Стандартные образцы для настройки ультразвуковых дефектоскопов // Неразрушающий контроль и диагностика: Сб. материалов 18 всерос. науч.-техн. конф. М.: Машиностроение, 2008. С. 80—310.

9. Пат. № 2378645 РФ. Способ настройки ультразвуковых преобразователей-дефектоскопов / В. И. Пудов, А. С. Соболев // Изобретения и полезные модели. 2010. № 1.

10. Соболев А. С., Пудов В. И. Модель построения многоэлементных отражателей для ультразвуковой аппаратуры // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 53—57.

11. ГОСТ 8.315—97. ГСИ Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения.

12. ГОСТ Р 55809—2013. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерения основных параметров.

13. ГОСТ Р 8.736—2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

14. ГОСТ 2789—73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

Дата принятия 12.08.2015 г.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

Начинается выплата авторского вознаграждения за статьи, опубликованные в 2015 г. в журнале «Measurement Techniques» — англоязычной версии журналов «Измерительная техника» и «Метрология». Выплата осуществляется Российским авторским обществом (РАО).

Подробности на www.rao.ru

Адрес: 123993 Москва, ГСП-5, ул. Б. Бронная, д. 6а, стр. 1
Российское авторское общество, отдел валютных расчётов
Тел.: +7 (495) 697-33-35; +7 (495) 697-54-86